

**43. JUPITER KONFERENCIJA**  
sa međunarodnim učešćem

**43<sup>rd</sup> JUPITER CONFERENCE**  
with foreign participants

# **ZBORNİK RADOVA** **PROCEEDINGS**



**UNIVERZITET U BEOGRADU - MAŠINSKI FAKULTET**

**UNIVERSITY OF BELGRADE**  
**FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING**

Beograd, oktobar 2022.



## EKSPERIMENTALNA IDENTIFIKACIJA SPECIFIČNIH SILA REZANJA SA EKSPERIMENTIMA OBIMNOG GLODANJA<sup>2)</sup>

### Rezime

*U radu je predstavljena eksperimentalna metoda za identifikaciju specifičnih sila rezanja, koja se bazira na procesu glodanja za tri različite vrste materijala. Jedan od bitnih pokazatelja tačnosti izrađenih delova i kvaliteta obrađene površine, pored režima rezanja, jesu sile rezanja koje u toku tog procesa postoje. Pojačani režimi rezanja, a samim tim i veće sile, mogu dovesti do oštećenja alata ili obratka. Da bi se ti neželjeni efekti predupredili, vrše se empirijski proračuni sila rezanja na osnovu specifičnih sila rezanja, koje se mogu određivati eksperimentalnim putem. Kako vrednosti specifičnih sila zavise od materijala alata i obratka, kao i geometrije alata korišćenog u procesu merenja, dobijaju se različite vrednosti izmerenih podataka. Vrednosti specifičnih sila se mogu iskoristiti u istraživačke svrhe pri konfigurisanju savremenih tehnoloških sistema za obradu materijala rezanjem podržanim mehatronskim sistemima za nadzor. Razmatrani vid unapređenja konfigurisanja tehnoloških sistema ima za cilj praćenje pojedinih parametara procesa u realnom vremenu i održavanje njihovih vrednosti konstantnim, ili optimizaciju programirane putanje alata.*

Ključne reči: *specifične sile rezanja, virtuelni obradni sistem, predikcija sila*

### 1. UVOD

Unapređenje korišćenja složenih i skupih resursa u savremenoj tehnologiji obrade metala rezanjem svojevremeno je dovelo do koncepta virtuelnog obradnog sistema sa idejom da faze projektovanja tehnologije budu podržane simulacionim okruženjem koje će obezbediti pouzdane predikcije najvažnijih efekata obrade, kao i optimizaciju elemenata režima obrade. Kao i u nešto novijem konceptu digitalnih blizanaca, u sferi tehnologije obrade, kamen temeljac za najrazličitije procedure unutar ovakvog simulacionog okruženja predstavljaju pouzdani modeli statike i dinamike elemenata obradnog sistema, sila rezanja i hrapavosti obrađene površine. Ovaj rad se bavi silama rezanja, kao neizostavnom pratiocu obrade rezanjem, a koje su uzrok brojnih neželjenih pojava, od grešaka mera i oblika obrađenih površina, usled elastičnih deformacija elemenata obradnog sistema, preko povećane potrošnje energije do ubrzane degradacije alata i njegovog loma.

Procedure predikovanja komponenata sila glodanja duž programirane putanje u simulacionom okruženju su dobro poznate [1, 2]. Istina je, s druge strane, da one nisu implementirane u komercijalno dostupne CAD/CAM sisteme, već su verifikovane kroz radove različitih naučnoistraživačkih institucija. Ograničenje za primenu ovih procedura je nedostatak dovoljno široke baze podataka sa takozvanim specifičnim silama rezanja za enormno veliki broj kombinacija materijala obratka, rezne geometrije i materijala alata, kakvi se mogu naći u realnim proizvodnim uslovima.

Osim pomenutog predikovanja komponenata sile rezanja duž programirane putanje, poznavanje ovih specifičnih sila je preduslov za naredni korak optimizacije procesa, kroz proceduru adaptacije brzine pomoćnog kretanja duž putanje, a sa ciljem održavanja konstantnom izabrane komponente sile.

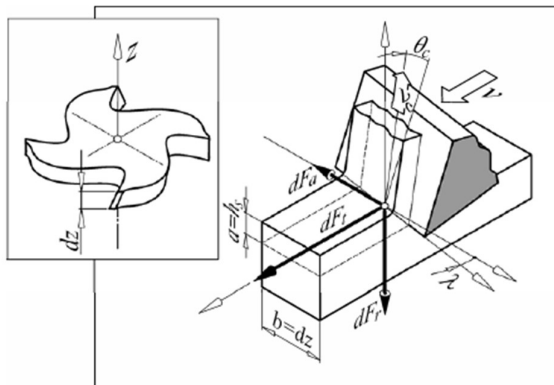
### 2. SPECIFIČNE SILE REZANJA

<sup>1)</sup> Nikola Vorkapić, ([nvorkapic@mas.bg.ac.rs](mailto:nvorkapic@mas.bg.ac.rs)), prof. dr Saša Živanović, ([szivanovic@mas.bg.ac.rs](mailto:szivanovic@mas.bg.ac.rs)), doc. dr Miloš Pjević, ([mpjevic@mas.bg.ac.rs](mailto:mpjevic@mas.bg.ac.rs)), Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Katedra za proizvodno mašinstvo.

<sup>2)</sup> Julija Maletić, ([julija.maletic@li.rs](mailto:julija.maletic@li.rs)), Ljubomir Nešovanović, ([ljubomir.nesovanovic@li.rs](mailto:ljubomir.nesovanovic@li.rs)), Lola Institut, Beograd.

<sup>3)</sup> U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja su realizovana u okviru projekta "Integrirana istraživanja u oblasti makro, mikro i nano mašinskog inženjerstva" i podprojekta TR35022 „Razvoje nove generacije domaćih obradnih sistema“, koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije po Ugovoru ev. br: 451-03-68/2022-14/200105 od 4.2.2022. god.

Većina reznih alata se odlikuje manje ili više složenom reznom geometrijom. U različitim procedurama predikovanja sila glodanja polazi se od sila koje deluju na maloj dužini sečiva. Na toj maloj dužini, bez obzira na oblik glavnog sečiva, može se smatrati da je sečivo pravolinijsko i da se svodi na model kosog rezanja sa tri komponente sile, pokazane na slici 1.



**Slika 1.** Sile rezanja na elementarnoj dužini glavnog sečiva pri kosom rezanju[2].

Modeli specifičnih sila rezanja korišćeni u najvećem broju literaturnih izvora se mogu svrstati na dva osnovna tipa, koji povezuju silu rezanja ili njenu određenu komponentu ( $j$ ) sa površinom poprečnog preseka nerezane strugotine ( $dA$ ) i eventualno sa elementarnom dužinom ( $dL$ ) sečiva u zahvatu.

Jedan od njih je Kienzleov model, oblika:

$$dF = K_c \cdot dA = K_c \cdot h \cdot dL$$

gde je  $h$  označena debljina nerezane strugotine.

Veza sile i debljine strugotine je u osnovi nelinearna, što opisuje izraz za izračunavanje  $K_c$ :

$$K_c = K_{c,1} h^{-m_c}$$

Baze podataka sa vrednostima konstanti  $K_{c,1}$  [ $N/mm^2$ ] i eksponenta  $m_c$ , za vrlo širok asortiman najrazličitijih materijala obradaka su dostupne i obično ih nude renomirani proizvođači reznih alata [7]. U praksi se ovaj model najčešće primenjuje za glavni otpor rezanja. Stoga se upotrebnost vrednosti modela sa takvim raspoloživim parametrima svodi uglavnom na procenu potrebne snage motora glavnog kretanja za određeni režim obrade. Vrednosti parametara  $K_{c,1}$  i  $m_c$  se daju za određene uglove rezne geometrije (npr. za nulti grudni ugao). Izvesno približenje realnim uslovima se ostvaruje korekcionim članom koji uzima u obzir stvarnu vrednost grudnog ugla:

$$K_c = K_{c,1} \cdot h^{-m_c} \left(1 - \frac{\gamma_0}{100}\right)$$

U različitim modulima za predikovanje i optimizaciju procesa obrade od značaja je, vrlo često, potrebno poznavanje svih komponentata koje deluju na elementarni deo sečiva, kako bi se za određene uslove obrade, njihovom integracijom, izračunale komponente otpora rezanja koje deluju na alat kao celinu. Komponente sile rezanja, u tangentnom, radijalnom i aksijalnom pravcu, na maloj dužini glavnog sečiva, koje se može smatrati pravolinijskim se često daju kao linearne funkcije:

$$\begin{aligned} dF_t &= K_{tc} h_c dz + K_{te} dz \\ dF_r &= K_{rc} h_c dz + K_{re} dz \\ dF_a &= K_{ac} h_c dz + K_{ae} dz \end{aligned} \quad (1)$$

U brojnim radovima [3-7] je ilustrovan vrlo dobar kvalitet predikcija sila glodanja, koji se zasniva na ovakvim modelima specifičnih sila rezanja i simulacije punog obrta glodala sa reznom geometrijom diskretizovanom u obliku diskova male debljine.

Dva su pristupa u eksperimentalnoj identifikaciji specifičnih sila rezanja za potrebe predikovanja sila glodanja. U literaturi [2] je opisan postupak, koji se svodi na eksperimente sa merenjem dveju komponentata sile pri ortogonalnom rezanju (obrada struganjem) za razmatrani par materijala alata i obratka. Ovi podaci, uz merenja kojima se određuje faktor sabijanja strugotine, dopuštaju da se kroz poznate transformacije, preko izračunatog ugla smicanja, dođe do specifičnih sila kosog rezanja, što je po pravilu slučaj kod obimnog glodanja.

Za očekivati je da drugi pristup, koji se zasniva na eksperimentima sa glodanjem za razmatrani par materijala alata i obratka, određeni grudni i leđni ugao i ugao zavojnice zuba, rezultuje pouzdanijim identifikovanim specifičnim silama rezanja.

Ovde bi trebalo naglasiti odnos područja primene identifikovanih specifičnih sila rezanja. Pristup koji se bazira na merenjima sile pri ortogonalnom rezanju je svakako univerzalan. Pomenute transformacije ortogonalnog u koso rezanje su primenjive na elementarno sečivo bilo kog alata (noža, burgije, glodala) za razmatrani par materijala alata i obratka. Odlika ovakvog pristupa je, dakle, ekstremno mali obim eksperimenata. Drugi pristup se odlikuje znatno ograničenijim područjem primene. Identifikovane specifične sile (iako verovatno, pouzdanije) važiće za određeni par materijala alata i obratka i za reznu geometriju određenog tipa glodala (grudni i leđni ugao i ugao zavojnice žljebova). Identifikovani parametri će biti primenjivi za bilo koji nazivni prečnik i broj zuba glodala razmatranog tipa i najrazličitije režime obrade.

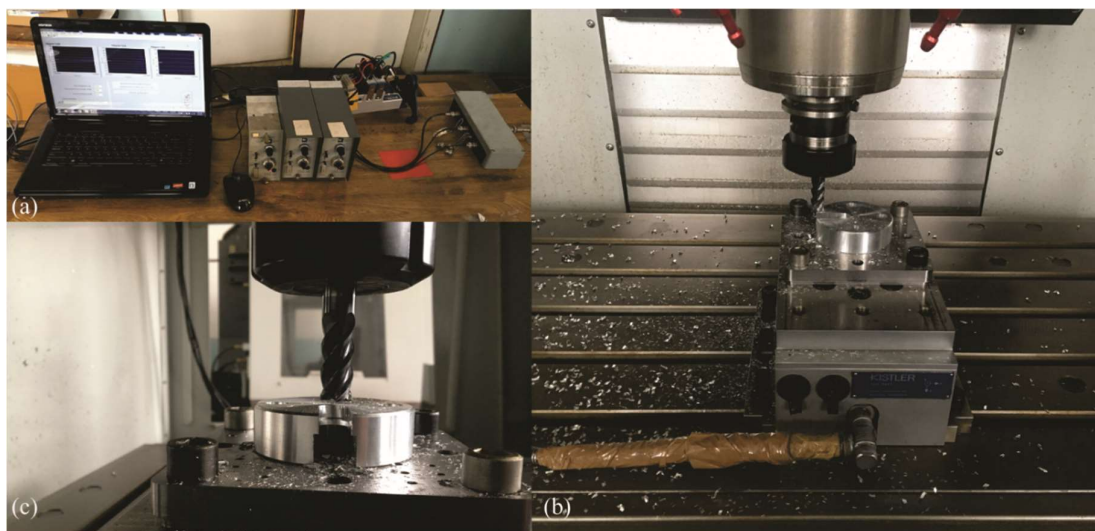
### 3. EKSPERIMENTALNA IDENTIFIKACIJA SPECIFIČNIH SILA REZANJA

Primeri eksperimentalne identifikacije specifičnih sila rezanja, opisane u ovom radu, odnose se na tri izabrana materijala obratka, relativno česta u proizvodnoj praksi, a za potrebe predikovanja sila glodanja glodalima od tvrdog metala. Primenjena metodologija je opisana u [1, 2].

Potrebni eksperiment se svodi na merenje tri međusobno upravne komponente sile glodanja pri maloj dubini, sa širinom glodanja jednakoj njegovom prečniku. Merenja se ponavljaju za različite brzine programiranog pomoćnog kretanja, sa ciljem da se ostvari varijacija koraka po zubu  $s_z$ , u smislenom opsegu. Tokom uzastopnih merenja sila jedini parametar koji se menja je upravo korak po zubu. U svakoj fazi ovakvog eksperimenta se prave vremensku zapisi signala komponentnih sila glodanja, pomoću sistema za akviziciju podataka.

#### 3.1 Detalji eksperimenta

Eksperimenti sa obradom glodanjem su vršeni na troosnoj glodalici HAAS VF3. Izabrana mašina ima mali broj radnih sati, što predstavlja neku vrstu garancije da je zazor u ležajima glavnog vretena zanemarljiv i da promena preseka strugotine pri obrtanju alata neće odstupati od nominalne, sinusoidalne. Na slici 2 prikazana je eksperimentalna postavka sa detaljima obradnog sistema, trokomponentnim dinamometrom, pojačivačima, sistemom za akviziciju podataka i računaru sa instaliranim softverom za DAQ.



*Slika 2. Eksperimentalna postavka za izvođenje eksperimenata*

Na slici 2a prikazan je sistem za akviziciju podataka. Korišćena su tri pojačivača, za svaku od komponenti sile rezanja po jedan, duž tri međusobno upravna pravca. U USB kućište sa četiri slota cDAQ-9174 postavljen je četvorokanalni analogni ulazni modul NI 9125 sa simultanim uzorkovanjem, koji vrši A/D konverziju pojačanog signala. Tako konvertovan signal zapisuje se u odgovarajuću datoteku na računaru (vremenski zapis). Softver koji je korišćen pri akviziciji podataka je LabView 12.0. Na slici 2b prikazan je trokomponentni dinamometar KISTLER 5112, na kojem se nalazi odgovarajuća prihvatna ploča za različite

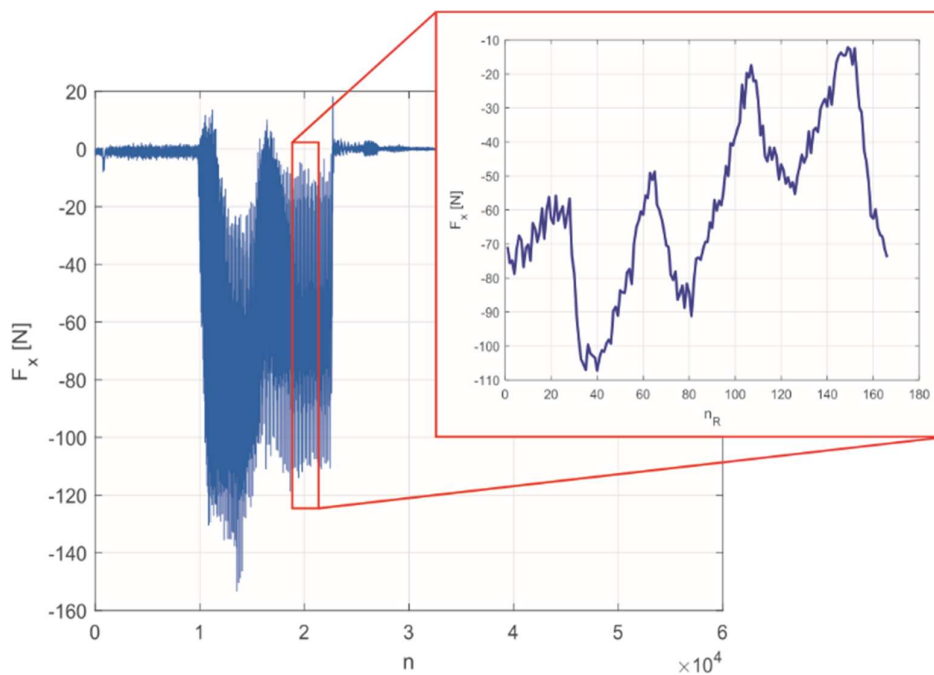
oblike priprema. Pripremak je u ovom slučaju cilindričnog oblika, prečnika 50 mm i visine 20mm.

Formiranje vremenskih zapisa je rađeno za niz eksperimenata za tri materijala obratka: legura aluminijuma ENAW 7075-T6, zatim legura ENAW 6028, pri čijoj obradi je korišćeno vretenasto glodalo sa četiri zuba od tvrdog metala za obradu aluminijuma, nazivnog prečnika 16mm, proizvođača ATORN. Treći materijal koji je obrađen je čelik EN 42CrMo4, u poboljšanom stanju. Pri njegovoj obradi korišćeno je vretenasto glodalo sa tri zuba od tvrdog metala za obradu čelika, nazivnog prečnika 16mm, istog proizvođača. Na slici 2c predstavljen je položaj alata u odnosu na obradak pri zauzimanju odgovarajuće dubine.

Posebna pažnja je potrebna pri planiranju obrade. Ideja da se koristi tanka ploča, pričvršćena za dinamometar, nije dobra jer će svakako doći do povlačenja ovakvog priprema (u pravcu ose Z) zbog zavojnih zuba glodala, kao posledica rastojanja zone rezanja i tačaka u kojima je pripremak stegnut. Za očekivati je da se u tom slučaju jave i naglašene vibracije obratka. Umesto toga, korišćen je kompaktni prizmatičan pripremak sa uzdužnim žljebom prema dinamometru. Pre svakog merenja se aktivira jednostavan program, koji formira kratak žljeb sa gornje strane obratka (nešto širi od glodala, na način da preostala debljina materijala do donjeg žljeba bude jednaka planiranoj dubini glodanja u esperimentu. Lamela koja se obrađuje je tada sa minimalnim prepustom u odnosu na osnovni materijal. Njena dužina se planira tako da je sa programiranom brzinom pomoćnog kretanja u eksperimentu moguće napraviti vremenski zapis za nekoliko punih obrta alata u stacionarnom režimu glodanja.

Na slici 3 je pokazan tipičan oblik vremenskog zapisa komponente sile glodanja u ovakvim eksperimentima. Četiri pika koja se mogu uočiti posledica su ulaska i izlaska u zahvat četiri zuba glodala kojim je vršena obrada. Neujednačenost vrednosti sile na ovim pikovima je posledica radijalnog bacanja glodala sa držačem u glavnom vretenu mašine.

Frekvencija odabiranja pri AD konverziji je u toku izvođenja eksperimenata podešena na  $f_s = 5500 \frac{S}{S}$ , što je pri programiranim brojevima obrta glavnog vretena rezultovalo brojem od 180 odabiraka po jednom obrtu glavnog vretena.



*Slika 3. Primer vremenskog zapisa trenutnih sila glodanja duž X pravca*

### 3.2 Obrada vremenskih zapisa i identifikacija specifičnih sila

Metodologija, opisana u [1, 2, 7], podrazumeva dva koraka u postupku obrade vremenskih zapisa komponentata sile glodanja u seriji eksperimenata za jedan par materijala alata i obratka i varirane vrednosti koraka po zubu.

Prvi korak je osrednjavanje vrednosti komponentata sile glodanja na celom broju obrtaja glavnog vretena. U tabeli 1 su pokazane osrednjene vrednosti komponentata sile, za primer niza eksperimenata pri obradi materijala ENAW7075-T6

**Tabela 1. Osrednjene vrednosti komponenta sile glodanja iz eksperimenata sa ENAW7075-T6**

$S_z$	0,002	0,005	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08
$F_{i,SR}$									
$F_{x,SR}$	-7,293	-17,494	-25,916	-40,483	-45,928	-51,844	-55,488	-58,645	-59,587
$F_{y,SR}$	1,416	11,093	29,384	56,515	68,722	82,959	99,994	113,817	136,362
$F_{z,SR}$	-10,647	-3,467	-3,479	-7,634	-14,893	-22,519	-25,383	-31,503	-41,361

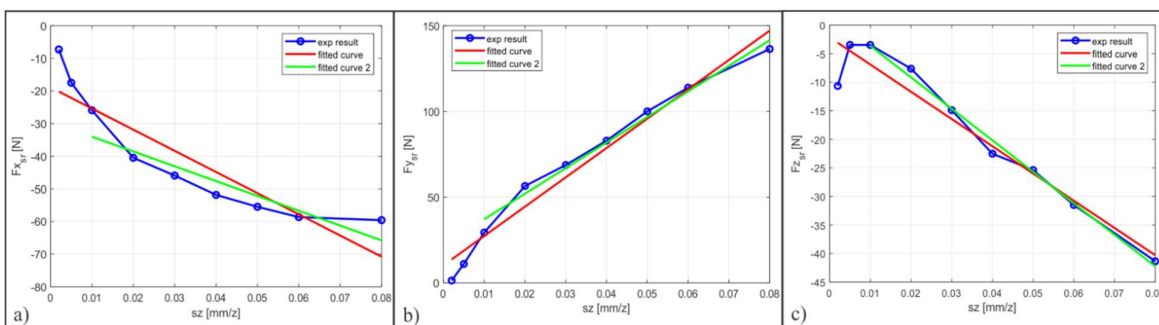
Matrična struktura sadržana u tabeli 1 je dovoljna da se može obaviti drugi korak procedure, a to je izdvajanje parametara linearne aproksimacije, koja povezuje  $F_{j,SR}$  i  $s_z$  ( $j=x,y,z$ ).

$$F_{x,SR} = \underline{F}_{x,e} + \underline{F}_{x,c} \cdot s_z$$

$$F_{y,SR} = \underline{F}_{y,e} + \underline{F}_{y,c} \cdot s_z \quad (2)$$

$$F_{z,SR} = \underline{F}_{z,e} + \underline{F}_{z,c} \cdot s_z$$

U tu svrhu je korišćena funkcija *polyfit* Matlab-a (aproksimacija polinomom prvog stepena). U konkretnom slučaju su razmatrana dva slučaja ove aproksimacije, što je ilustrovano slikom 4.



**Slika 4. Aproksimacija srednjih vrednosti komponenti sile glodanja iz niza eksperimenata**

U jednom slučaju (crvena linija) su aproksimacijom obuhvaćene vrednosti osrednjenih sila glodanja za sve vrednosti koraka po zubu iz tabele 1. U drugom slučaju (zelena linija) su za fitovanje iskorišćene vrednosti uz izuzetak tačaka koje odgovaraju koracima po zubu ispod 0.01mm/z. U nastavku su zadržani parametri pravih (koeficijent pravca i odsečak na ordinatnoj osi) iz drugog pomenutog slučaja. Ovo je učinjeno sa obrazloženjem da će takav linearni model u simulaciji sila glodanja rezultovati većim predikovanim vrednostima, što je svakakao na strani sigurnosti. Za vrednosti izdvojene iz eksperimenata pri obradi ENAW7075-T6 parametri ovih linearnih modela su pokazani u tabeli 2.

**Tabela 2. Parametri linearnih modela osrednjenih komponenta sile glodanja**

$\underline{F}_{xc} [N]$	$\underline{F}_{xe} [N]$	$\underline{F}_{yc} [N]$	$\underline{F}_{ye} [N]$	$\underline{F}_{zc} [N]$	$\underline{F}_{ze} [N]$
-648,461	-18,8995	1709,4	10,285	-477,065	-2,133

Treći korak pomenute metodologije je izračunavanje 6 vrednosti specifičnih sila rezanja:

$$\begin{aligned}
 K_{tc} &= \frac{4 \cdot \underline{F}_{yc}}{z \cdot a} & , K_{te} &= \frac{\pi \cdot \underline{F}_{ye}}{z \cdot a} \\
 K_{rc} &= \frac{-4 \cdot \underline{F}_{xc}}{z \cdot a} & , K_{re} &= \frac{\pi \cdot \underline{F}_{xe}}{z \cdot a} \\
 K_{ac} &= \frac{\pi \cdot \underline{F}_{zc}}{z \cdot a} & , K_{ae} &= \frac{2 \cdot \underline{F}_{ze}}{z \cdot a}
 \end{aligned} \quad (4)$$

Na osnovu izraza 4 [1] i koeficijenata datih u tabeli 2, određene su vrednosti specifičnih sila rezanja za materijal ENAW7075-T6 i predstavljene u tabeli 3. Pored njih, u tabeli su date i vrednosti koeficijenata za ostala dva materijala, ENAW6026 i EN 42CrMo4, za koje je obavljen niz eksperimenata sa varijacijom koraka po zubu.

**Tabela 3. Identifikovane specifične sile rezanja za razmatrane materijale obratka**

Materijal	$K_{tc} [N]$	$K_{te} [N]$	$K_{rc} [N]$	$K_{re} [N]$	$K_{ac} [N]$	$K_{ae} [N]$
ENAW 7075-T6	1139,6	5,3854	432,3072	9,8958	-249,79	-0,7111
ENAW 6026	815,651	10,897	323,015	9,565	-194,225	1,635
EN 42CrMo4	2421,8	8,461	842,931	4,928	-4,441,694	-0,628

## 5. ZAKLJUČAK

U radu su pokazane faze pripreme i izvođenja eksperimenata sa obimnim glodanjem i naknadna obrada vremenskih zapisa sa ciljem identifikacije specifičnih sila rezanja za tri materijala obratka. Korišćena je metodologija koja je poznata u literaturi, a koja polazi od linearnog modela zavisnosti komponentnih sila rezanja od debljine strugotine. Težnja je istraživačkog tima da kroz dalji rad formira dovoljno veliku bazu podataka sa vrednostima specifičnih sila rezanja za materijale obradaka, koji se sa velikom frekvencijom pojavljuju u realnom proizvodnom okruženju.

Deo rezultata koji je dobijen u prvoj fazi obrade vremenskih zapisa, u ovom radu, podstiče na razmišljanje da se pokuša sa razvojem nelinearnog modela komponentnih sila, što suštinski menja algoritam identifikacije specifičnih sila rezanja.

## 6. LITERATURA

- [1] Kokotović, B., Vorkapić, N., Feedrate Optimization for 2.5D Milling Operations, FME Transactions (2019), Volume 47, No 3., pp. 613-623, doi: 10.5937/fmet1903613K, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Department for Production Engineering, Belgrade, jun 2019.
- [2] Kokotović, B., Obrada glodanjem u virtuelnom obradnom sistemu, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet, Beograd 2013.
- [3] Ko, Jeong Hoon, Won-Soo Yun, Dong-Woo Cho, and Kornel F Ehmann. 2002. "Development of a virtual machining system, part 1: approximation of the size effect for cutting force prediction." Review of. International Journal of Machine Tools and Manufacture 42 (15):1595-605.
- [4] Budak E. Altintas Y., Armarego E.J.A., Prediction of Milling Force Coefficients From Orthogonal Cutting Data May 1996 Journal of Manufacturing Science and Engineering 118(2)
- [5] Altintas, Yusuf, Christian Brecher, Manfred Weck, and S Witt. 2005. "Virtual machine tool." Review of. CIRP annals 54 (2):115-38
- [6] E. Budak Analytical models for high performance milling. Part I: Cutting forces, structural deformations and tolerance integrity, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 46, Issues 12–13, October 2006, Pages 1478-1488
- [7] Y. Altintas, S. Engin, Generalized modeling of mechanics and dynamics of milling cutters, Annals of the CIRP 50 (2001) 25–30.
- [8] Technical Guide-Materials ISO, Sandvik-Coromant

Vorkapić, N. 1), Maletić, J. 2), Nešovanović, Lj. 2), Živanović, S. 1), Pjević, M. )

## EXPERIMENTAL IDENTIFICATION OF SPECIFIC CUTTING FORCES WITH EXPERIMENTAL MILLING

*Abstract: The paper presents an experimental method for identifying specific cutting forces based on the milling process for three different types of materials. One of the crucial indicators of the accuracy of the manufactured parts and the quality of the processed surface, in addition to the cutting mode, are the cutting forces that exist during the process. Increased cutting modes, and therefore higher forces, can damage the tool or workpiece. In order to prevent these unwanted effects, empirical calculations of cutting forces are performed based on specific cutting forces, which can be determined experimentally. As the values of specific forces depend on the material of the tool and workpiece and the tool's geometry used in the measurement process, different values of the measured data are obtained. The values of specific forces can be used for research purposes when configuring modern technological systems for processing materials by cutting, which are supported by mechatronic systems for monitoring the processing process. The main goal is to monitor specific parameters of the process in real-time, maintaining them constantly or optimizing the programmed path of the tool.*

**Key words:** *specific cutting forces, virtual machining system, force prediction*